土壤與環境，民國八十九年六月，第三卷，第二期，第95頁至第112頁
Soil and Environ., June 2000, Vol. 3, No. 2, p95-p112.

土壤有機質初始狀態與過度分解現象之關係

The relationship of initial soil organic matter and over decomposition phenomenon

陳琦玲 [1] 林正鎊 [2*] 薛惠文 [2]
Chiling Chen [1] Chenfang Lin [2*] Hueiwen Shiue [2]

ABSTRACT

An over decomposition phenomenon was discovered in the simulation process of soil organic matter decomposition. The over decomposition phenomenon presented the special hollow curve of soil organic matter accumulation which decreased temporally to the lower level than initial condition, then gradually increased to the final equilibrium level. The phenomenon usually happened when easily decomposed portion of initial soil organic carbon was great. This study discussed the relationship of initial soil organic matter and over decomposition phenomenon. The results of simulation process showed that: (1) The over decomposition could not be simulated by the mono-variable model, due to the partitioning of soil organic carbon could not be described by such a model. (2) According to the Jenkinson-Rayner model simulation, the phenomenon could easily occur when initial soil organic carbon contained great decomposable and resistant plant material. The change extent of curve was increased as the decomposable plant material portion was increased. (3) The phenomenon could never occur when the stabilized soil organic matter portion of initial soil organic carbon was great. (4) No matter how much organic matter was added, the phenomenon could never occur after soil organic carbon reached an equilibrium.

Key words : soil organic carbon, initial condition, over decomposition.

摘　要

有機質的轉化過程長期以來一直是土壤研究者關心的重點。根據過去的研究，發現一種土壤有機質總量自較高之初始狀態，會因後續之年度添加量不足以維持原有含量時，逐漸降解至一個低含量點，而後又漸漸累積，終至呈一新的穩定態之特殊“過度分解”現象。此現象可能發生在初始狀態含較多易分解之物質。因此本文主要爲探討模式變數設定及土壤有機質初始狀態與過度分解現象出現之相關性。

根據模式模擬結果顯示：(1)單變數模式因爲沒有土壤有機質形態之劃分，未能

1. 台灣省農業試驗所農化系。Department of Agricultural Chemistry, Taiwan Agricultural Research Institute, Wufeng, Taiwan.
2. 國立中興大學土壤環境科學系。Department of Soil and Environmental Sciences, National Chung Hsing University, Taichung, Taiwan. *Corresponding author.
* Corresponding author

模擬過度分解現象。(2)若模擬初始之易分解態與抗分解態植物殘體佔土壤總有機碳之絕大比例，將較易出現過度分解現象，且其變化幅度隨易分解態植物殘體在植物殘體中所佔之比例增加而變大。(3)若模擬初始之穩定態有機質佔絕大部分，則不會出現過度分解現象。(4)當土壤有機碳達穩定平衡後，無論添加多少量，都不會出現過度分解現象。

關鍵詞：土壤有機質，初始狀態，過度分解。

前 言

有機質在土壤中的分解轉化過程，長久以來一直是土壤研究者的工作重點。近幾年再加上有關氣候變遷、有機農業、永續農業、土壤劣化等，眾所關注的課題，使得土壤有機質的研究愈加受到重視。

有關有機質在土壤中之分解與聚積，前人從各種不同探討角度所作之試驗，已累積相當多之相關資訊 (Stevenson, 1986)。而以系統分析方式，整合前人試驗所得之資訊，以機制性模式來模擬土壤有機質之轉化行為是一優越方法 (Parton *et al.*, 1987)。綜觀前人研擬之土壤有機碳轉化機制，多是藉著土壤有機碳轉化之微分方程式中所定義之隨時間變化之各種不同的變數，來描述不同特性的有機物 (Molina *et al.*, 1994；陳，1998)。

土壤有機碳轉化過程之模式化，乃始於 Jenny (1941) 與 Henin 和 Dupuis (1945)，他們將土壤有機質視為一均質狀態變數，以一概括的分解速率常數，描述在固定的肥培與作物制度下土壤有機質之分解。由於他們的模式僅考慮總有機碳，所以可以實驗測值來定義。早期模式發展者由於僅能用紙和筆來計算數學演算過程，因此受到很大的限制。但在 1973 年 Beek 和 Frissel 利用電腦求得微分方程之數值解後，則使模式發展者可以定義更複雜的變數。

模式發展者對於變數之定義，乃根據其在土壤碳和氮轉化之角色及穩定度。大部分依其分解速率常數之穩定尺度來分類。擁有較大的分解速率常數之變數乃指在碳循環中，若沒有再補充，則很快地就消失了；分解速率常數較小之常數，則在尺度之另一端 (Molina *et al.*, 1994)。

整合有機質轉化過程之模式發展者，可依據其對有機質轉化之複雜過程，釐定複雜之機制性模式，以方便未來模式之擴展與應用。然而複雜的設定，將會增加模式變數與參數之數目，在參數鑑定上相當困難。另一方面，模式之驗証需要長期的試驗資料，此長期資料往往需要數十年甚至上百年的數據，始能看出土壤有機碳的變化趨勢，而在有機碳的測定上，往往僅有總有機碳之測定，並沒有按有機質的特性及狀態作分離。因此，對於模式模擬之轉化過程不易從試驗得到驗証，因此目前模式最大的應用仍在於土壤總有機質之分解與累積之估計，對於土壤有機質趨向穩定時之特性與品質仍不易証實 (陳，1998)。然而依據林等 (1998) 以 Jenkinson 和 Rayner 模式模擬土壤有機質總量之分解與聚積時，發現在某些參數與初始條件下，會出現一種土壤有機質總量低於初始狀態，而後漸增，至終呈穩定態之"過度分解"現象，此現象常出現於模擬初始之有機質含有大量易分解物質，且每年的添加量不及其分解量之時。根據靈敏度分析亦顯示，初始有機質含較多比例之 DPM (Decomposable plant material) 與 RPM (Resistant plant material) 等易分解部分，是使過度分解現象提早出現，且使其最低點與初始及平衡穩定時之有機質總量之差距

土壤與環境，民國八十九年六月，第三卷，第二期，第95頁至第112頁
Soil and Environ., June 2000, Vol. 3, No. 2, p95-p112.

加大的可能狀態之一。

本文係延續此一現象的發現，選擇從最簡單之單變數模式，以至雙常數模式及代表性複變數模式 (Jenkinson-Rayner 模式與 Lin *et al.*模式) 進行分析，檢視模式各模式對此一現象之模擬能力，並探討過度分解現象的發生情形與初始有機組成之關係。期藉由模擬研究，對土壤有機碳轉化過程中可能發生之過度分解現象有更多的了解，以為將來試驗證明時，設計實驗方法之依據。

材料與方法

為檢視各種模式對過度分解現象之模擬能力，並探討過度分解現象的發生情形與初始有機組成份之關係。本文先介紹幾個代表性模式的理論架構，並以農業試驗所 (台北) 長期試驗化肥區中土壤有機碳變化數據，進行模式中參數之鑑定，再調整模擬之初始土壤有機碳的組成，檢視是否在某一特定的初始狀態，模式具有模擬過度分解現象之能力。另選擇初始有機碳較高之林等 (1995) 玉米桿分解試驗，探討在 Jenkinson-Rayner 模式架構下，不同的初始有機組成與過度分解現象之關係。首先針對含有不同比例之難、易分解物質，但總量相等之土壤有機質為初始條件，檢視過度分解現象的發生情形。其次測試土壤有機質達穩定後，每年添加不同量的有機質，是否仍會出現過度分解現象。

一、土壤環境中碳轉化模式之理論解析

(一) 單變數一階反應式：

此為描述土壤有機碳分解過程的最簡易模式，乃將土壤有機質視為一均質狀態變數，以一概括的分解速率常數，描述在固定的肥培與作物制度下，有機殘質與施用之有機質肥料在土壤中之分解。模式說明如下：

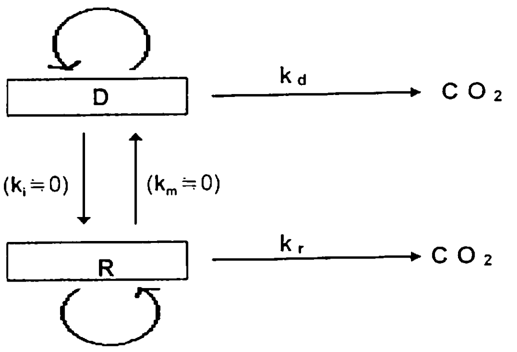
$$\frac{d(SOC)}{dt} = A - k(SOC) \quad \text{.....................(1)}$$

式中A 為每年的作物殘體回歸量及／或有機質肥料施用量中之總碳量，SOC 表示土壤有機碳，k 為土壤有機碳分解反應速率常數。此模式曾被多次用於計算作物殘體分解速率與土壤有機質達平衡之含量 (Jenny, 1941 ; Kirkham and Bartholomew, 1955 ; Russell, 1964 ; Russell, 1975 ; Hsieh *et al.*, 1980)。

(二) 雙變數一階反應式：

此模式乃以土壤有機質包括易分解與抗分解部分進行模擬 (圖一)，一般之通式如下：

$$\frac{dD}{dt} = p_d A - k_d D \quad \text{.................................(2)}$$



D	- decomposable fraction of organic material
R	- resistant fraction of organic material
k_d	- rate constant of D
k_r	- rate constant of R
k_m	- rate constant of mobilization
k_i	- rate constant of immobilization

圖一、雙變數之有機質轉化模式示意圖

Fig. 1. Diagram of soil carbon transformation bi-variable model. (Source: Jenkinson and Ayanaba, 1977; 王等, 1987)

$$\frac{dR}{dt} = p_r A - k_r R \qquad \text{......(3)}$$

式中 A 爲每年之有機資材添加碳量，p_d 與 p_r 則分別爲有機資材中易分解與不易分解之比例。D 與 R 分別表示易分解與抗分解部分，k_d 與 k_r 分別爲 D 與 R 之分解速率常數。此模式亦曾多次被用於計算作物殘體分解速率與土壤有機質達平衡之含量 (Jenkinson and Ayanaba，1977；王等，1987；Campbell，1978；Matus and Rodriguez，1994)。

(三) Jenkinson-Rayner 模式：

Jenkinson 和 Rayner (1977) 試圖模擬英國 Rothamsted 試驗農場的土壤有機質轉化現象，而提出下述動力學模式 (圖二)。將土壤有機質分成五個部分：易分解植體 (DPM)、抗分解植體 (RPM)、微生物 (BIO)、物理性穩定態有機質 (POM) 和化學性穩定態有機質 (COM)。有機殘質進入土壤時必屬於前二者之一，分解時每一部分均產生相同之產物：即二氧化碳、微生物、及最後兩個分解極慢之物理性或化學性穩定態有機質。其數學化公式如下：

$$\frac{d(DPM)}{dt} = p_d A - k_d (DPM) \qquad \text{......(4)}$$

$$\frac{d(RPM)}{dt} = p_r A - k_r (RPM) \qquad \text{......(5)}$$

$$\frac{d(BIO)}{dt} = k_d p_b (DPM) + k_r p_b (RPM) - k_b (BIO) + k_b p_b (BIO) + k_p p_b (POM) + k_c p_b (COM) \qquad \text{......(6)}$$

$$\frac{d(POM)}{dt} = k_d p_p (DPM) + k_r p_p (RPM) + k_b p_p (BIO) - k_p (POM) + k_p p_p (POM) + k_c p_p (COM) \qquad \text{......(7)}$$

$$\frac{d(COM)}{dt} = k_d p_c (DPM) + k_r p_c (RPM) + k_b p_c (BIO) + k_p p_c (POM) - k_c (COM) + k_c p_c (COM) \qquad \text{......(8)}$$

式(4)、(5)中 A 爲每年之有機殘質添加量，p_d 與 p_r 分別爲有機殘質中易分解與抗分解之比例，k_d、k_r、k_b、k_p、k_c 分別爲 DPM、RPM、BIO、POM 及 COM 之分解速率常數。p_b，p_p，p_c 則分別爲分解過程中轉爲 BIO、POM 與 COM 之分配比率。

此模式在 1990 年之修正模式將土壤有機質分成 DPM、RPM、BIO、HUM (Humus) 及不分解部份 (Inert organic matter, IOM) (Jenkinson, 1990；Jenkinson *et al.*, 1994)。雖然模式架構已作部分修正，然而，土壤有機質本身之特性非常複雜，其分解與聚積亦是不可分割的連續過程，在目前各組成之分解速率仍不易鑑定下，仍延用 Jenkinson and Rayner (1977) 所建立的模式。

(四) Lin 等 (1987) 模式：

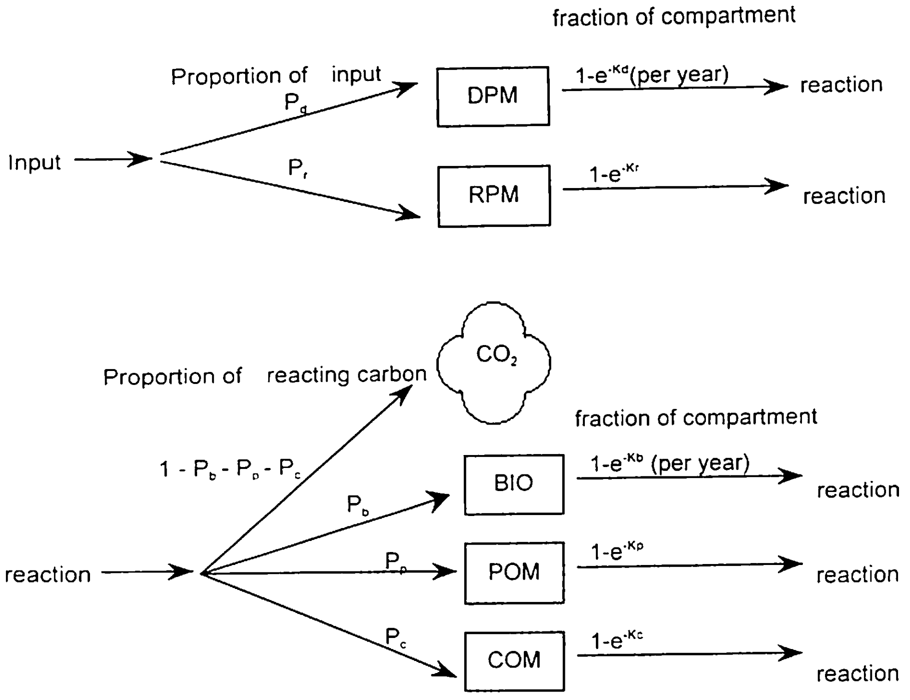
Lin 等 (1987) 所用以模擬有機殘質在土壤中轉化作用之模式理論，乃根據前人 Jenkinson 和 Rayner (1977)、Hunt (1977) 及 van Veen 和 Paul (1981) 所提出之三個模式的理論與機制，綜合整理成一新的模式 (圖三)。當有機物進入土壤之初，其碳氮比即可加以測定。經由下式

$$S = 0.07 + 1.11 (N/C)^{1/3} \qquad \text{......(9)}$$

式中 S 表示有機物中易分解物質之比例，以計算此一有機物中易分解部分 (LDF)，與抗分解部分 (RDF) 之比例。此二者之分解速率如式(10)及(11)：

$$\frac{d(LDF)}{dt} = -k_1 (LDF) \qquad \text{......(10)}$$

土壤與環境，民國八十九年六月，第三卷，第二期，第95頁至第112頁
Soil and Environ., June 2000, Vol. 3, No. 2, p95-p112.



DPM	- decomposable plant material
RPM	- resistant plant material
BIO	- biomass
POM	- physically stabilized organic matter
COM	- chemically stabilized organic matter
k_d, k_r, k_b, k_p, k_c	- rate constants of DPM, RPM, BIO, POM, COM
P_d, P_r	- decomposable and resistant fractions of plant material
P_b, P_p, P_c	- proportions transformated to BIO, POM and COM

圖二、Jenkinson and Rayner (1977) 之有機質在0～23公分土層中轉化模式示意圖
Fig. 2. Flow of C through model from unitary inpnt of plant C into the 0-23 cm layer of soil. (Source: Jenkinson and Rayner, 1977)

$$\frac{d(RDF)}{dt} = -k_r(RDF) \qquad \text{..............................(11)}$$

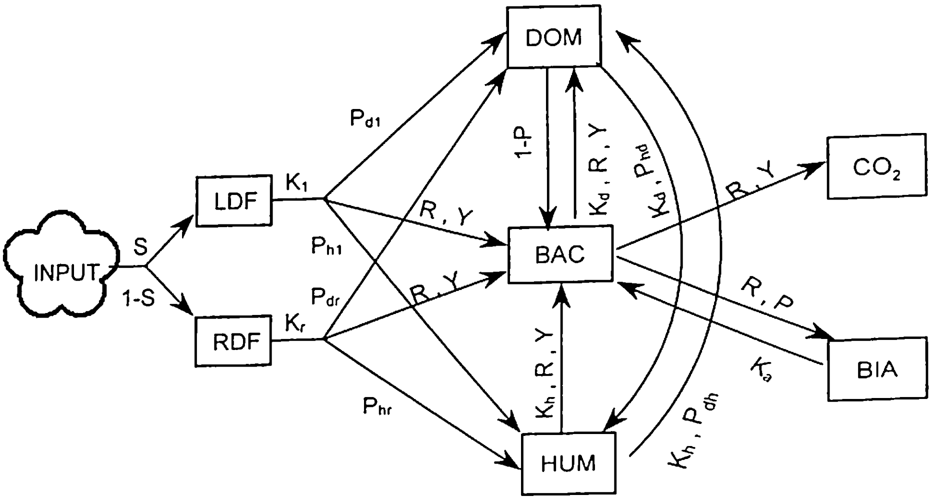
式中 k_l、k_r 表示LDF與RDF之分解速率常數。此新加入之基質分解後可形成數個部分，可爲生物量 (Biomass)，包括了具活性 (BAC) 和不具活性 (BIA) 之分解者，及由分解者產生之可分解土壤有機質 (DOM) 與腐植質 (HUM)。

根據 Hunt (1977) 的模式，BAC 和BIA 的變化可由總分解量(D)來決定，當

(1) D>R × BAC

$$\frac{d(BAC)}{dt} = Y(D - R \times BAC) + k_a(BIA) \qquad \text{..(12)}$$

$$\frac{d(BIA)}{dt} = -k_a(BIA) \qquad \text{..............................(13)}$$



LDF	- labile deomposable fraction of organic material
RDF	- resistant decomposable fraction of organic material
BAC	- active biomass
BIA	- inactive biomass
DOM	- decomposable organic matter in soil
HUM	- humic substance
CO_2	- evolution rate of CO_2
S	- initial portion of labile material
Y	- maximum growth yield
R	- maintenance energy requirement
P	- percent of microbes in excess of those which can be supported by the available substance remain viable in an inactive state
k_l, k_r, k_d, k_h	- rate constants of LDF, RDF, DOM, HUM
k_a	- activation rate constant
P_{dl}, P_{hl}	- proportions transformated to DOM and HUM from LDF
P_{dr}, P_{hr}	- proportions transformated to DOM and HUM from RDF
P_{dh}	- proportion transformated to DOM from HUM
P_{hd}	- proportion transformated to HUM from DOM

圖三、有機殘質在土壤中轉化之組合模式

Fig. 3. The assembled model for organic residue transformation in soil. (Source: Lin et al., 1987)

在此 k_a 表示不具活性之 BIA 之活化速率常數。Y 之定義爲微生物最大生長，設爲 60 %量。式(12)中 R 微生物維持呼吸所需能量，爲絕對溫度(T)之函數，

$$R = 2.82 \times EXP(32.24 - 10000/T) \quad \text{............(14)}$$

(2)若 D<R × BAC，則

$$\frac{d(BAC)}{dt} = \frac{1}{\Delta t \times R}(1.01D - R \times BAC) \quad \text{....(15)}$$

$$\frac{d(BIA)}{dt} = \frac{P}{\Delta t \times R}(R \times BAC - 1.01D) \quad \text{...........(16)}$$

式(16)表示超出總分解量所能支持之微生物，其中有比例爲 p 的部分，藉失去活性轉入 BIA 狀態，而保留其生存能力。其餘的

土壤與環境，民國八十九年六月，第三卷，第二期，第95 頁至第112 頁
Soil and Environ., June 2000, Vol. 3, No. 2, p95-p112.

部分則死亡而成爲土壤中易分解有機質(DOM)。

DOM 、 HUM 的變化則可以式(17)與(18)來表示：

$$\frac{d(DOM)}{dt} = k_l p_{dl}(LDF) + k_r p_{dr}(RDF) - k_d(DOM) + k_h p_{dh}(HUM) + \frac{(1-p)}{\Delta t \times R}(R \times BAC - 1.01D) \qquad (17)$$

$$\frac{d(HUM)}{dt} = k_l p_{hl}(LDF) + k_r p_{hr}(RDF) + k_d p_{hd}(DOM) - k_h(HUM) \qquad (18)$$

式(17)、(18)中之 k_d 、 k_h 表示 DOM 與 HUM 之分解速率常數。 p_{dl} 與 p_{dr} 則爲 LDF 和 RDF 轉化爲 DOM 之比例，餘者類推。式(17)中最後一項僅在 D<R × BAC 時始存在。

D 所表示之分解總量包括從 t 時間到 t+△t 時間中 LDF 、 RDF 、 DOM 和HUM 的所有差量總和。此模式主要由式(9)到(18)所構成。並且引用 van Veen 和 Paul (1981) 所考慮之環境因子 (溫度與水分) 對分解速率造成的影響關係式，二因子間假設互爲獨立。

二、農業試驗所(台北)長期試驗描述與說明

本研究用於各模式參數之鑑定與過度分解現象檢視之長期試驗資料，乃採用陳和連 (1995) 所整理之台灣長期試驗資料：農業試驗所 (台北) 每年二期作水稻之水田 48 年 (1924-1972 年) 長期試驗 (農業部業務功程，1929-1942 ；張等， 1947 ；林等， 1973)。由於 Lin 等 (1987) 模式，已涵蓋氣候因子，而試驗點並未有氣象之觀測，因此引用距離最近，資料較齊全之中央氣象局台北測候站的資料。該站自 1931 年至 1960 年歷年的平均溫度 (Air temperature) 約爲 22.1 ℃ ，歷年平均雨量則約爲 2100 ㎜。模擬測試時採用多年的平均氣象資料進行測試。試驗區之土壤爲砂頁岩新沖積土 (Sandstone and shale younger alluvial soils)，壤質土壤，排水不良，pH 值爲 4.7 ，有機碳含量 1.73 %，總體密度 1.2 g/cm^3 。不同肥料處理之每年的作物殘體估計量及有機質肥料施用量列於表一。

農試所 (台北) 1924-1972 年間水稻的同種肥料連用試驗，共設 12 個處理，每一處理二重複，本文僅以其中化肥區之土壤有機質歷年的變化數據，進行各模式的參數鑑定。水稻品種包括在來種和蓬萊種，在來種係於 1924 年開始試驗，第一期作用短廣花螺，第二期作用短腳尖，而蓬萊種則於 1926 年開始試驗，第一、二期作均用台中 65 號。本報告僅針對在來種資料進行檢討與土壤有機碳模擬。各處理小區面積 1930 年前爲 33 m^2，1931 年起爲 13.2 m^2，但 1941 年記錄上爲 16.5 m^2。

長期試驗中只有 1943 年和 1944 年因故中止，改種甘藷。化肥區各期作乃施用 451 kg/ha 硫酸銨 (95 kg/ha N)，從 1924 年至 1972 年一期作共 93 期作，施用 8835 kg/ha 氮素。1924-1971 年再來種一期作稻穀平均產量分別爲 2797 kg/ha ，二期作爲 2307 kg /ha ， 1924-1946 年一期作稻蒿平均產量 2743 kg/ha ，二期作爲 3134 kg/ha 。各期作水稻殘體的估算乃引用曾 (1981) 所得之單位面積的根乾重約爲稻穀產量之 0.33 ～ 0.37 的結果，以稻穀產量之 1/3 來估算水稻殘留於土壤之根乾重。水稻斷株乾重則以稻蒿乾重之 1/6 估算。按此估算方法，各期作水稻殘體提供之碳量爲 1.0 Mg/ha 。

長期試驗中土壤有機碳的測定，分別摘自張等 (1947) 和林等 (1973) 報告中 1946 年第二期作水稻收割後與 1972 年第一期作水稻收割後土壤樣本之分析資料。其餘年份則沒有資料可查詢。以上測定方法均是採用溼分解氧化法，張等 (1947) 未摘錄引

表一、農業試驗所(台北)長期試驗中化肥區作物殘體／化學肥料施用量與其碳、氮含量

Table 1. Carbon and nitrogen contents and rates of crop residues/inorganic fertilizer applied in the inorganic fertilizer plots of long-term experiment in Taiwan Agriculture Research Institute, Taiwan.

1. Taipei: rice-rice, 1924 1st crop~1972 2nd crop (1943, 1944 sweet potato) (Source ：張等，1947 ；林等，1973)

Trt.[1]	Crop	Crop residue/ Inorganic fertilizer	C(%)[2]	N(%)[2]	Rate(kg/ha) Matter[3]	C	N
IF	1st rice	rice stubble	40	0.7	2743/6	183	3.2
		root	40	0.7	2797/3	273	6.5
		$(NH_4)_2SO_4$	-	21	451	-	95.3
	2nd rice	rice stubble	40	0.7	3134/6	209	3.7
		root	40	0.7	2307/3	308	5.4
		$(NH_4)_2SO_4$	-	21	451	-	95.3
	Annual					973 (0.054%)	209.4

(1) Trt: IF: Inorganic fertilizer

(2) 40% C and 0.7% N of rice stubble and root based on dry weight were assumed according to Maeda and Shiga(1978) for the experiment in Taipei.

(3) based on dry weight.

(4) Estimated rate of rice stubble = yield of straw/6 (based on dry weight).

(5) Estimated rate of rice root = yield of grain/3 (based on dry weight).

用分析方法文獻，林等 (1973) 乃引用Black (1965) 分析方法。由於沒有初始土壤有機碳資料，故在假設無肥區之土壤有機質已趨於相當穩定的情形下，以 1946 年無肥區試驗的土壤有機碳含量作爲模擬起點。林等 (1973) 報告中之各處理區土壤有機碳含量，乃是在來種與蓬萊種相同處理區之平均值。

三、各模式之土壤有機碳變化的模擬

以農業試驗所 (台北) 長期試驗之土壤有機碳變化數據爲基礎，並且在比較不同處理間土壤有機碳的累積情形下,假設土壤有機碳的最終穩定值爲 2.36 %，以曲線吻合 (Curve Fitting) 方法進行模式中之參數值鑑定。由於試驗資料中僅有土壤總碳量資料，故只有單變數一階模式可得到確定之參數值，其他多組成模式因涉及更多不同組成轉化資料之需求，因此參數之鑑定相當困難。爲使模擬過程能符合一般文獻上所提出之研究結果，在參數的鑑定過程中，除了使模擬值符合試驗實測值外，並參考前人之試驗結果，選擇土壤有機碳轉化平衡時間不超過 2000 年之參數組合。另外，含有微生物生質量之模式，其對生質量之模擬值，不超過總有機碳之 10 % (Hunt, 1977)。各模式之數值分析方法採用 RK-2 方法 (Conte and de Boor,1980)，模擬時間差採用0.1 年。

Lin 等 (1987) 之模式中假設有機殘體之難易分解部分之比例，乃與有機殘體之 C/N 有關。由於長期試驗資料中並未有詳細之有機殘體之碳與氮含量之實測值，故引用

Maeda 和 Shiga (1978) 與農試所 (霧峰) 試驗田之分析資料，假設稻蒿與根之含氮量假設為0.7 %，稻穀 1.0 %。台北化肥區所施用有機殘體，加上化學肥料之氮素其C/N值為 60.8 。

四、各模式對於土壤有機碳初期特殊分解動態模擬之檢視與比較

為檢視前述代表性模式對過度分解現象之模擬能力，乃以前述各模式對於農業試驗所 (台北) 長期試驗化肥區中土壤有機碳分解參數之鑑定結果，在嘗試不改變土壤初始有機碳總量，僅改變其組成的情形下，檢視是否在某一特定的初始狀態，模式具有模擬過度分解現象之能力，以探討模擬該現象所需之模式架構。各模式之數值分析方法採用RK-2 方法 (Conte and de Boor, 1980)，模擬時間差採用0.1 年。

五、過度分解現象之分析

為進一步探討土壤有機質初始狀態與過度分解現象之關係，另以林等 (1995) 15℃玉米桿分解試驗中所鑑定的參數值為例，利用Jenkinson 和 Rayner (1977) 動態模式進行過度分解現象之分析。數值分析方法採用 RK-2 方法 (Conte and de Boor, 1980)，模擬時間差採用0.1 天。

首先，以土壤總有機碳含量均為5.7 %，但含有不同性質，即含有不同比例的難、易分解之有機物質為初始狀態為起點，每年添加0.525 %的有機碳，來模擬土壤有機碳的動態，模擬時間共500 年。

另一方面，測試在土壤有機碳已達穩定後，每年分別添加0.175 ，0.35 ，0.525 ，0.7 ，0.875 ，及 1.05 %有機碳，檢視是否將造成過度分解現象。模擬作業是假設初始狀態為2.7 %土壤有機碳，每年先添加0.525 %土壤有機碳量，模擬200 年，使其趨近平衡狀態 (平衡時土壤有機碳含量約為3 %) 後，再分別以0.175 ，0.35 ，0.525 ，0.7 ，0.875 ，1.05 %土壤有機碳量為每年的添加量，模擬300 年。檢視以平衡穩定狀態之土壤有機碳為起點時，每年分別添加不同量之有機碳，是否會造成過度分解現象。

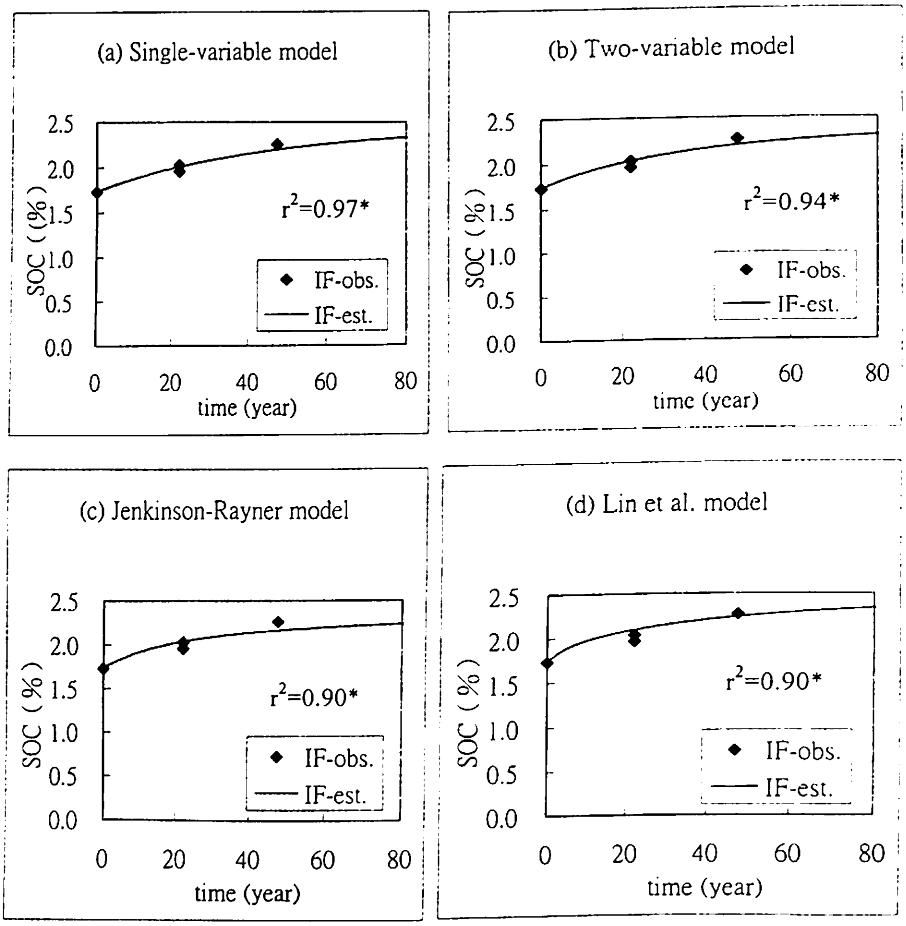
結果與討論

一、各模式之土壤有機碳變化之模擬

本文採用之長期試驗資料，雖沒有初始的有機組成分析，但由於台灣位於熱帶與亞熱帶區，高溫多溼的環境，使土壤有機質的分解快速，在長期耕作下，殘留於土壤中之有機質，應以不易分解物質佔大部份。又根據陳和王 (1992) 對台灣農耕土壤之分析亦顯示，在未將腐質素 (Humin) 計入的情況下，黃酸 (Fulvic Acid) 與腐質酸 (Humic Acid) 之碳含量已佔總碳量之60 %。由於供試土壤是採長期耕作之土壤，因此本研究在各模式之模擬過程，均假設初始之土壤有機碳是含有較多 (>80 %) 的難分解物質，如圖四所設定。

根據長期試驗之土壤有機碳變化趨勢，以曲線吻合方法進行各模式之參數鑑定，其結果如圖4 之說明。由模擬結果顯示，雖然土壤有機質的組成複雜，但在台灣環境下，在設定土壤有機碳的最終穩定趨向是一致時，對於總有機碳的模擬，各模式均可藉參數之調整，使模擬值與實測值相近，並且已達統計相關的顯著水準。由於此次模擬乃以嘗試錯誤法作參數之鑑定，故各模式可能再藉更進一步的調整，可得更高的r^2 值。模擬結果亦顯示，在假設初始之土壤有機碳是含有較多難分解物質，則不會出現過度分解現象。

Collins 等 (1990) 曾比較單變數與雙變數模式，顯示單變數模式雖然不能描述不



圖四、各模式對於農業試驗所(台北) 長期試驗中化肥區土壤有機碳變化之模擬

Fig. 4. Simulation of soil organic carbon by various models for inorganic fertilizer plot of long-term experiment in Taiwan Agriculture Research Institute, Taipei.

Initial condition and identified parameters:

(1)Single-variable model: SOC_0=1.73%, k=0.0229/yr

(2)Two-variable model: DPM_0=0.3, RPM_0=1.43, kd=0.0531/yr, kr=0.0135/yr, Pd=0.55%, Pr=0.45%

(3)Jenkinson-Rayner model: DPM_0=0.01%, RPM_0=0.1%, BIO_0=0.02%, POM_0=0.4%, COM_0=1.2%, kd=1.2/yr, kr=0.066/yr, kb=0.1/yr, kp=0.01/yr, kc=0.007/yr, Pd=0.4%, Pr=0.6%, Pb=0.07%, Pp=0.14, Pc=0.07

(4)Lin et al. model: LDF_0=0.01%, RDF_0=0.10%, DOM_0=0.5%, HUM_0=1.1%, BAC_0=0.01%, BIA0=0.01%, k1=0.5/yr, kr=0.18/yr, kd=0.03/yr, kh=0.00309/yr, ka=0.01/yr, Pd1=0.2%, Pdr=0.4%, Pdh=0.5%, Ph1=0.02, Phr=0.03, Phd=0.04, Y=0.6, PP=0.15

土壤與環境，民國八十九年六月，第三卷，第二期，第95頁至第112頁
Soil and Environ., June 2000, Vol. 3, No. 2, p95-p112.

同有機碳庫 (Organic carbon pool) 對整個分解速率之分配與影響，但足以描述在270 KPa和20 ±0.5 ℃下培育之小麥殘體之短期 (30天) 分解試驗。但由本研究單變數模式對於長期試驗數據之模擬則顯示，單變數模式亦可用於台灣環境下土壤總有機碳變化之模擬。

林等 (1995) 曾以同一組實驗室玉米桿150天的分解試驗 (劉， 1987)，在鑑定模式參數後，比較單變數一階反應式及Jenkinson和Rayner (1977) 5個變數一階反應式，用於估算施加玉米桿有機碳平衡後之土壤有機碳含量，顯示單變數一階反應式之估計值約為5個變數一階反應式之7～10倍，有明顯高估之現象，指出有機質的轉化不會是單純的一個階段反應。另一方面，提出若要以單變數一階反應式進行土壤有機碳之模擬與預測，則必須收集足夠的實驗數據，特別是對於穩定平衡狀態的確定至為重要，如果所分析之範圍包括已平衡數據在內，則較不會發生外插性的累積誤差。本研究雖因長期試驗中只有2次土壤有機碳測值，而不易看出是否已趨向平衡，但由其他長期試驗結果 (陳與連，1995) 及土壤調查結果 (郭等， 1995)，顯示在台灣環境下，因土地利用或耕作方式的改變，所引起之土壤總有機碳的變化，在50年間應已趨向平衡。因此本研究在設定土壤有機碳已達平衡下，各模式均可藉參數的調整，模擬長期試驗中土壤總有機碳的變化。甚至是單變數模式亦可模擬整個土壤總有機碳的變化。連與陳(1995)對台北雙期作水田，屏東水旱輪作田與善化旱作田的土壤有機碳變化之模擬結果亦顯示，單變數模式是模式足以模擬台灣環境下，已涵蓋平衡數據的長期試驗中土壤有機碳變化趨勢。

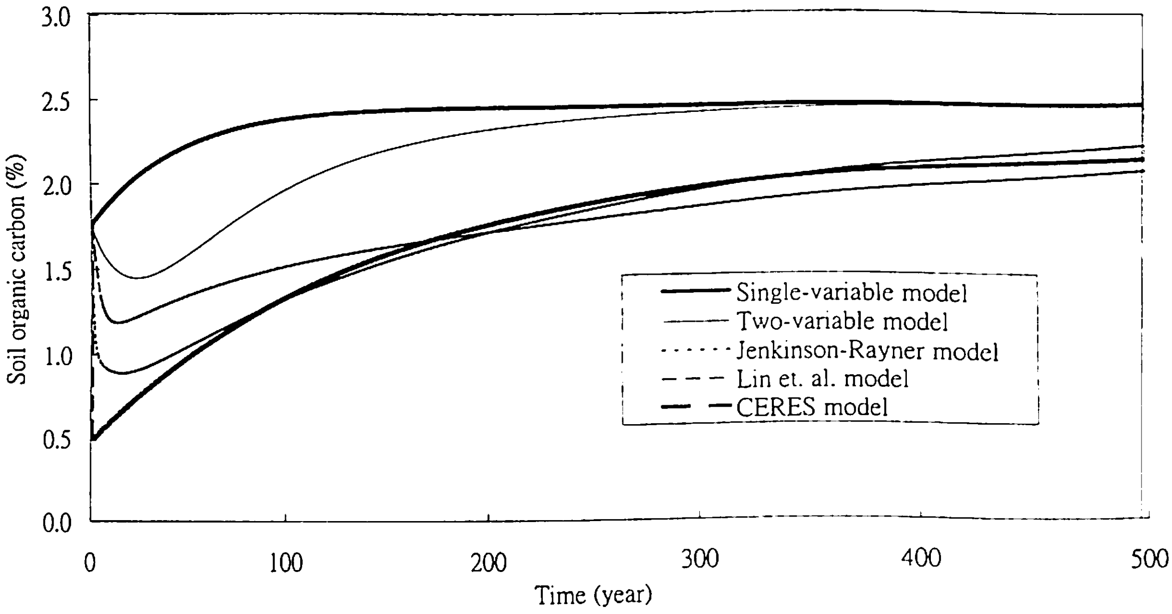
二、各模式對於土壤有機碳初期分解動態之模擬特性檢視與比較

為檢視前述代表性模式對過度分解現象之模擬能力，本文以農業試驗所(台北)長期試驗中土壤有機碳變化數據為基礎，在以含較高比例不易分解物質之初始有機碳的情況下，所鑑定的參數，在不改變土壤有機碳總量，僅改變其組成的情形下，檢視是否在某一特定的初始狀態，模式具有模擬過度分解現象之能力。圖五僅列出各模式其中一組初始有機碳組合的模擬結果。根據模擬結果，除了單變數模式，由於對於土壤有機質組成並沒有劃分，對於初始狀態沒有調整的空間，因此無法模擬出過度分解現象，其餘三種多變數模式均可出現明顯的過度分解現象。

模擬結果亦顯示，初始有機碳狀態的改變，僅改變初期土壤有機碳的動態，並不會改變土壤總有機碳最終穩定平衡值，雖然達平衡的時間，各模式因所鑑定的參數而異，但是最終穩定值仍維持在原來參數鑑定時所達到的數值。此結果與林等 (1999) 之模擬結果是一致的。

此種過度分解現象有別於一般的起應效果 (Priming effect)，因為一般添加有機物於土壤中，由於增加碳、氮源，而使土壤微生物大量繁殖，以致造成短時間有機物的大量分解，即有機物的分解速率加快，但此現象持續時間不致太長 (Broadbent and Nakashima, 1974)，而本研究討論之過度分解現象則持續數十年的時間，且有機物各組成的分解速率維持一定。

美國密蘇里大學在1888年成立Sanborn農場的草原處女地，植生相包括75 % C4草類及各種C3植物，在1915年後轉種小麥及梯牧草 (Timothy) 的長期試驗資料 (Balesdent *et al*., 1988)，亦顯示此種過度分解現象。但作者認為在小麥連作試驗中，



圖五、各模式以台北試驗化肥區所鑑定之參數模擬土壤有機碳過度分解現象

Fig. 5. Simulated the over-decomposition of soil organic carbon by different models using the identified parameters for the inorganic fertilizer treatment in Taipei.

Initial condition:

(1)Single-variable model: SOC=1.73%

(2)Two-variable model: D=1.7% R=0.03%

(3)Jenkinson-Rayner model: DMP=1.0%, RPM=0.7%, BIO=0.01%, POM=0.01%, COM=0.01%

(4)Lin et. al. model: LOF=1.0%, ROF=0.7%, DOM=0.01%, HUM=0.01%, BAC=0.005%, BIC=0.005%

土壤有機質有逐漸增加之趨勢，乃因在1950年以後每年有機物投入量增爲2倍之故，而轉種梯牧草試驗，則認爲其在1915年以後有機碳測定値之變異較大，但一般而言，是趨向平衡狀態。另一個試驗則是在原來草原改種C3牧草61年後，從1950年起連續種植C4玉米36年，於1962，1975與1986年採土樣分析。很可惜，在轉作時與轉作前均沒有採土樣分析，因此不能確定轉作時土壤有機碳確實含量，但根據渠等1950年土壤有機碳之推估値，則在轉作玉米之36年間有明顯的過度分解現象，不過作者並未對此現象有進一步的說明，但作者在其他有機質存在形態的分離實驗中，提出應由含2個不同分解速率的變數之簡單模式，來模擬表土有機質的變化才較恰當。由以上長期試驗之數據顯示，在特定的土地利用改變時，有出現過度分解現象之可能性。

依據Schnitzer (1978) 之分析結果，顯示土壤腐植質約佔礦質土有機質之65～75%，又按Jenkinson 和 Rayner (1977) 之模擬結果，亦顯示在每年投入1 Mg/ha 碳量下，達最終平衡時，POM 與COM 所含之碳佔全有機碳之97 %，此顯示在一般的耕地，經過長年固定的耕作制度下，土壤已達到

某一平衡狀態，且大部分不會有很高比例之不易分解物質的情形下，上述之過度分解現象並不易見。然而對於新開墾草原處女地轉作旱作，則可能會出現過度分解現象，此時即使是僅探討土壤總有機碳的變化，也必須是擁有兩個變數以上之模式才能模擬此種現象。Voroney 等 (1989) 亦曾提出雙變數模式雖未考慮微生物之反應與轉化過程，但對於有機殘質分解過程之描述相當有用。

三、初始有機碳狀態與過度分解現象關係之分析

根據林等 (1995) 15 ℃玉米桿分解試驗，所鑑定的參數值爲例，以原來試驗之5.7 %土壤有機碳爲初始值，在設定六種不同的土壤初始條件下 (如圖六 (1)～(6)之說明)，每年添加0.525 %土壤有機碳量，模擬結果分別如圖6(1)～(6)。從模擬500年之過程，可看出土壤有機碳最終的平衡趨勢，只與模式參數值及添加量有關，與初始條件無關。由多次模擬土壤總有機碳之動態的結果顯示，在模擬初始時，若DPM與RPM佔有機碳的70 %以上，則較易出現過度分解現象，且此現象之幅度，隨著DPM佔植物殘體比例增加而增大，過度分解現象之最低點亦會提早出現。而在模擬初始時，若是POM或COM超過有機碳的30 %，則不會出現過度分解現象，如圖6(4)～(5)，但更高的POM與COM比例，則在圖6(6)初始條件之設定下，在模擬初期出現極小幅度之過度分解現象，以後逐漸累積至低於原來初始値之高峰，而後則逐漸降解至一與其他例子相同的平衡水準，此現象較爲特殊，可進一步進行其分解與聚積之細步探討，然而以試驗來驗証此初期過度分解現象，則相當困難，因爲變化幅度小，土壤不均勻性與土壤總有機碳分析之誤差，可能使其無法以試驗數據來驗証此特殊現象。

在以2.7 %土壤有機碳爲初始值，在每年添加0.525 %土壤有機碳量情況下，先模擬200年，使其趨近穩定平衡時 (平衡時土壤有機碳含量約爲3 %)，再分別以每年0.175，0.35，0.525，0.7，0.875，1.05 %土壤有機碳爲添加量進行模擬，結果如圖七 (1)～(6)，顯示在土壤有機碳達穩定平衡後，無論添加量是多少，都不會出現過度分解現象。根據模式鑑定參數模擬結果，在200年時土壤有機態存在的狀態爲DPM=0.002，RPM=1.07，BIO=0.158，POM=1.377，COM=0.189 %，而Jenkinson和Rayner (1977) 依據英國Rothamsted農場黑麥草十年田間孵育試驗結果鑑定之參數，在每年添加1 Mg /ha/yr有機碳的情形下，模擬10000年後，土壤含有24.2 Mg/ha有機碳，其中DPM=0.01，RPM=0.47，BIO=0.28，POM=11.3，COM=12.2 Mg/ha，二組參數對土壤總有機碳最後存在形態之預測略有差異，特別是POM與COM所佔土壤總有機碳比例，取決於原來鑑定參數值。

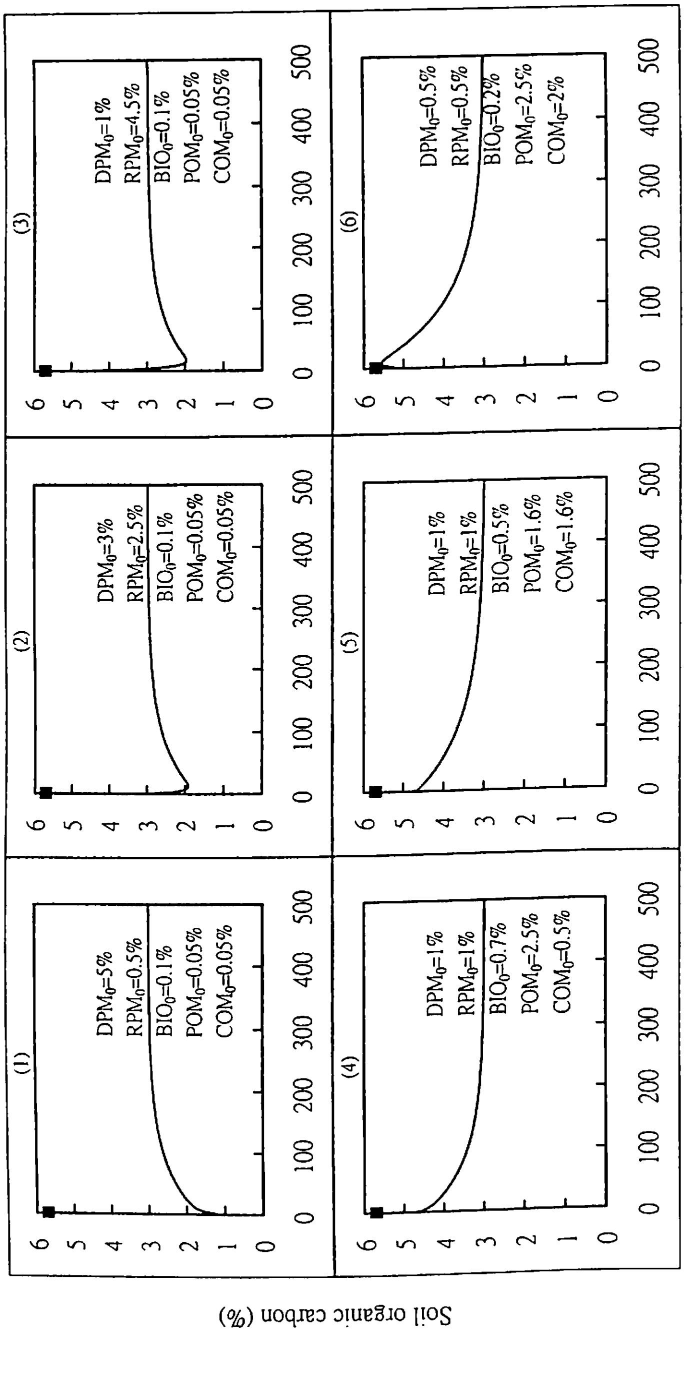
在Jenkinson 和 Rayner (1977) 文中根據英國Rothamsted農場黑麥草十年的田間孵育試驗所鑑定之參數值如下：

速率常數 (1/yr)：k_d=4.2，k_r=0.3，k_b=0.41，k_p=0.014，k_c=0.00035，

分配比例：p_d=0.837，p_r=0.163，p_b=0.076，p_p=0.125，p_c=0.0035。

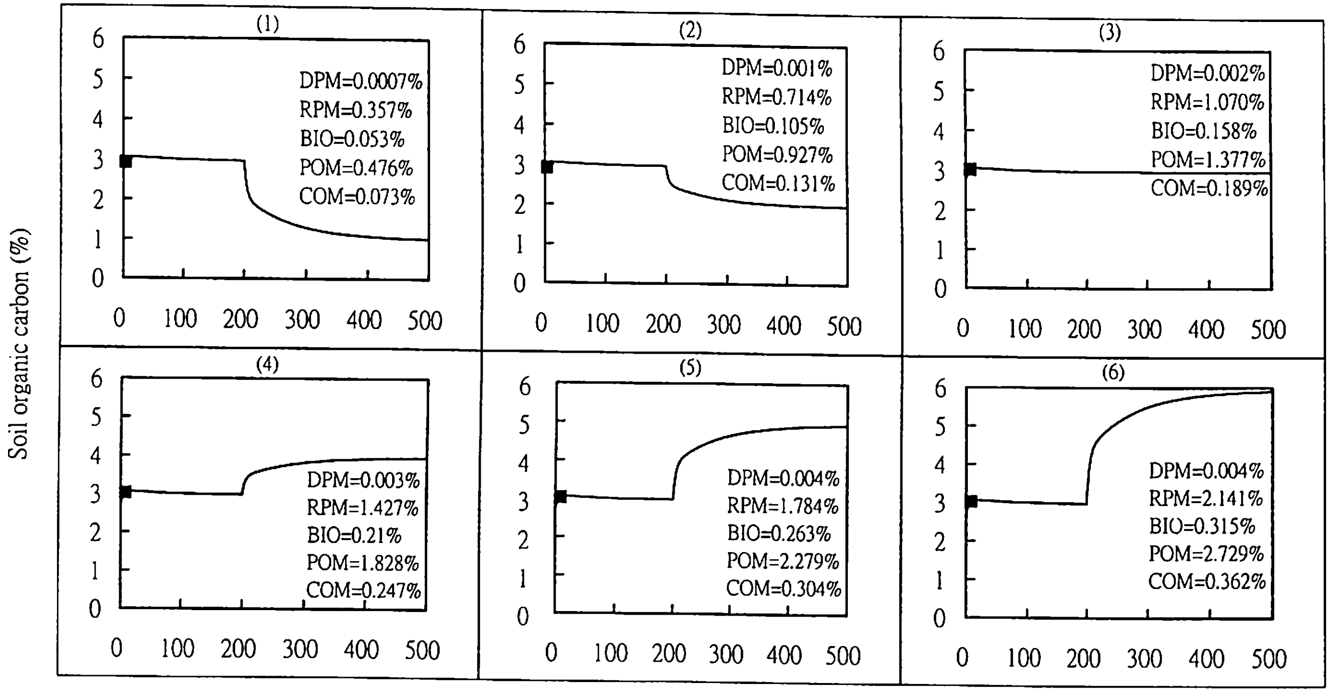
而在林等 (1995) 文中針對玉米桿150天的實驗室孵育試驗結果所鑑定之參數值如下：

速率常數 (1/yr)：k_d=4.8，k_r=0.261，k_b=0.232，k_p=0.014，k_c=0.00872，



圖六、Jenkinson-Rayner 模式對於不同初始有機組成之逐年有機碳添加後之土壤碳變化趨勢模擬

Fig. 6. Trends of soil organic carbon simulated by Jenkinson-Rayner model for annual input of organic matter with different initial compositions.



圖七、Jenkinson-Rayner model 對於土壤有機質在達3％平衡狀態後添加不同施用量碳之土壤有機碳變化趨勢模擬

Fig. 7. Trends of soil organic carbon simulated by Jenkinson-Rayner model for different annual input after being stabilized at 3% from 2.7% initial condition and 0.525% annual input.

分配比例：p_d=0.392，p_r=0.608，p_b=0.0644，p_p=0.0331，p_c=0.00282。

由於與穩定狀態之POM及COM殘量直接相關之係數為k_p與p_p及k_c與p_c，而在林等 (1995) 文中k_p和Jenkinson和Rayner (1977) 文中者相同，但k_c則增加近25倍，所以採用林等 (1995) 參數值，穩定狀態之COM佔總碳量之比例減少，是可以預期的，當然與p_p與p_c亦有關係，但影響不及k_c值大。

結 論

對於初始土壤有機碳含有較多比例之易分解部分，所導致的過度分解現象，由於單變數模式沒有土壤有機碳形態之劃分，而未能模擬出此種現象，其他三個多變數模式均可模擬。因此，就土地利用形態改變以導致土壤有機碳之過度分解現象之可能性的預測而言，除了單變數模式以外，只要擁有兩個變數以上之模式均可適用。

在模擬初始時，若易分解態植物殘體與抗分解態植物殘體佔土壤總有機碳的70%以上，較易出現過度分解現象；若物理性穩定態有機質或化學性穩定態有機質佔絕大部分，則不會出現過度分解現象。另外，當土壤有機碳達穩定平衡後，無論添加多少的土壤有機碳，都不會出現過度分解現象。此分析結果可作為將來以試驗証明過度分解現象時，試驗設計之參考依據。

誌 謝

本研究承蒙國科會計畫經費補助〔NSC87-2313-B005-006-A12〕，謹此誌謝。

參考文獻

王西華、鄭正勇、章莉菁、李勝隆、林碧霞、凌美月。1987。台灣地區有機質肥料與既有堆肥資源調查與研究。行政院科技顧問組委託調查研究計畫報告書。

林正錺、吳宗澤、林麗惠、陳琦玲。1998。土壤有機質降解過程過度分解現象。土壤與環境。1:43-49.

林正錺、林欣華、劉慧甄、陳琦玲。1999。土壤有機質分解聚積之模擬。中國農業化學會誌。37(5)。(已被接受印刷中)

林正錺、林欣華、劉慧甄。1995。土壤有機質分解聚積之模擬。有機質肥料合理施用技術研討會專刊。pp.84-94.

林家棻、李子純、張愛華、陳卿英。1973。長期連用同樣肥料對於土壤化學性質與稻谷收量之影響。農業研究 22(4)：241-262。

張守敬、林家棻、步焱昇。1947。同種肥料連用對於水稻產量及土壤理化性之影響。台灣農業試驗所彙報。第3號：18-41。

郭鴻裕、朱戩良、江志峰、吳懷國。1995。台灣地區土壤有機質含量及有機資材之施用狀況。有機質肥料合理施用技術研討會專刊。84年5月11-12日，台灣，台中。pp.72-83。

陳琦玲、連深。1995。台灣若干土壤有機質分解、聚積之模擬及有機質肥料施用基準之試定。有機質肥料合理施用技術研討會專刊。84年5月11-12日，台灣，台中。pp.171-190。

陳琦玲。1998。土壤環境中碳與氮轉化之模式解析研究。國立中興大學博士論文。

陳立夫、王敏昭。1992。台灣兩種主要農

耕土壤腐植酸之光譜及其他分析特性。中國農業化學會誌。30(1):33-42。

曾國珍。1981。還原電位和總體密度對水稻根系分佈與產量的影響。國立中興大學土壤學研究所碩士論文。

農業部業務功程。1929-1942。水稻的肥料連用試驗。台灣總督府中央研究所。

劉滄棽。1987。有機殘質在土壤中轉化模式之研究。國立中興大學土壤學研究所碩士論文。

Balesdent, J., G. H. Wagner, and A. Mariotti. 1988. Soil organic matter turnover long-term field experiments as revealed by carbon-13 natural abundance. Soil Sci. Soc. Am. J. 52:118-124.

Beek, J. and M.J. Frissel. (ed.). 1973. Simulation of nitrogen behavior in soils. PUDOC, Wageningen, Netherlands. P67.

Black, C.A. (ed.). 1965. Methods of soil analysis. Part 2. Agronomy 9, American Society of Agronomy.

Broadbent, F.E. and T. Nakashima. 1974. Mineralization of carbon and nitrogen in soil amended with C-13 and N-15 labeled plant material. Soil Sci. Soc. Am. Proc. 38:313-315.

Campbell, C.A. 1978. Soil organic carbon, nitrogen, and fertility. pp.173-272. In: M. Schnitzer and S.U. Khan(ed.) Soil organic matter. Elsevier Scientific Publ. Co., Amsterdam.

Collins, H.P., L.F. Elliott, R.W. Rickman, D.F. Bezdicek and R.I. Papendick. 1990. Decomposition and interactions among wheat residue components. Soil Sci. Soc. Am. J. 54:780-785.

Conte, S.D., and C. de Boor. 1980. Elementary numerical analysis, an algorithmic approach. Mc Graw-Hill, Inc., N.Y., N.Y.

Henin, S., and M. Dupuis. 1945. Essai de bilan de la matiere organique du sol. Ann. Agron. 15:17-29.

Hsieh, Y.P., M.D. Che and C.L. Liu. 1980. Effect of land disposal of sewage sludge on soil environmental qualities. I .Organic matter decomposition. Natl. Sci. Counc. Monthly, ROC 8:903-912.

Hunt, H.W. 1977. A simulation model for decomposition in grasslands. Ecology. 58:469-484.

Jenkinson D.S. and A. Ayanaba. 1977. Decomposition of carbon-14 labeled plant material under tropical conditions. Soil Sci. Soc. Am. J. 41:912-915.

Jenkinson, D.S. 1990. The turnover of organic carbon and nitrogen in soil. Philosophical Transactions of the Royal Society. B 329. pp:361-368.

Jenkinson, D.S., and J.H. Rayner. 1977. The turnover of soil organic matter in some of the Rothamsted classical experiments. Soil Sci. 123:298-305.

Jenkinson, D.S., N.J. Bradbury and K. Coleman. 1994. How the Rothamsted classical experiments have been used to develop and test models for the turnover of carbon and nitrogen in soil. pp.117-138. In: R.A. Leigh and A.E. Johnston (ed.) Long-term experiments in agricultural and ecological sciences. University Press, Cambridge U.K.

Jenny, H. (ed.) 1941. Factors of soil formation. McGraw-Hill, New York.

Kirkham, D. and Bartholomew, W.V.. 1955. Equations for following nutrient

transformation in soil, utilizing tracer data II. Soil Sci. Soc. Am. Proc. 19: 189- 192.

Lin, C.F., T.S. Liu, and T.L. Hu. 1987. Assembling a model for organic residue transformation in soils. Proceedings of the National Science Council. Part B: Life Sciences. Vol.11, No.2. pp.175-186. April 1987, Taipei, Taiwan, R.O.C.

Maeda, K. and H. Shiga. 1978. Year-long decomposition processes of various organic materials in a lowland field. J. Sci. Soil Manure, Japan 49:455-460. (In Japanese)

Matus, F.J. and J. Rodriguez. 1994. A simple model for estimating the contribution of nitrogen mineralization to the nitrogen supply of crops from a stabilized pool of soil organic matter and recent organic input. Plant Soil. 162:259-271.

Molina, J.A.E., H.H. Cheng, B. Nicolardot, R. Chaussod and S. Houot. 1994. Biologically active soil organics: A case of double identity. pp.169-177. In: J.W. Doran, D.C. Coleman, D.F. Bezdicek, and B.A. Stewart(ed.) Defining soil quality for a sustainable environment. SSSA Special Publication Number 35. Madison, Wisconsin, U.S.A.

Parton, W.T., D.S. Schimel., C.V. Cole, and D.S. Ojima. 1987. Analysis of factors controlling soil organic matter levels in Great Plains grasslands. Soil Sci. Soc. Am. J. 51:1173-1179.

Russell, J.A. 1964. Mathematical expression of seasonal changes in soil organic matter. Nature (Lond.) 204:161-162.

Russell, J.S. 1975. A mathematical treatment of the effect of cropping system on soil organic nitrogen in two long-term sequential experiments. Soil Sci. 120:37-44.

Schnitzer, M. 1978. Humic substances: Chemistry and reactions. pp.1-64. In M. Schnitzer and S. U. Khan(ed.) Soil organic matter. Elsevier North-Holland, Inc., New York.

Stevenson, F.J.(ed.). 1986. Cycles of soil carbon, nitrogen, phosphorus, sulphur, micronutrients. John Wiley & Sons, New York.

van Veen, J.A., and E.A. Paul. 1981. Organic carbon dynamics in grassland soils. I. Background information and computer simulation. Can. J. Soil Sci. 61:185-201.

Voroney, R.P., E.A. Paul and D.W. Anderson. 1989. Decomposition of wheat straw and stabilization of microbial products. Can. J. Soil Sci. 69:63-77.